

Patent number: DE3425811

Publication date: 1985-03-14

Inventor: GEBHARDT WOLFGANG DIPL PHYS DR (DE)

Applicant: FRAUNHOFER GES FORSCHUNG (DE)

Classification:

- international: *G01B17/02; G01H5/00; G01S15/88; G01B17/02; G01H5/00; G01S15/00; (IPC1-7): G01B17/02; G01H5/00; G01S15/88*

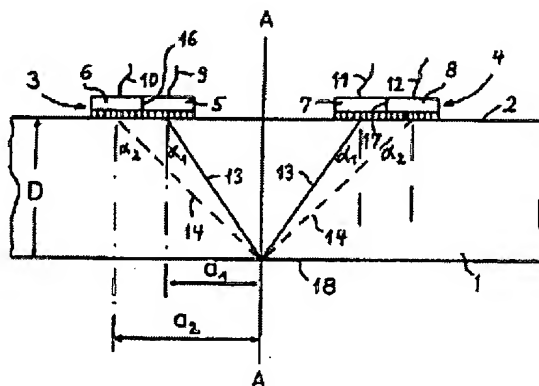
- european: G01B17/02; G01H5/00; G01S15/88

Application number: DE19843425811 19840713

Priority number(s): DE19843425811 19840713; DE19833325487 19830714

Report a data error here

A method for independently determining both the sound velocities of ultrasonic waves and the wall thickness of plane-parallel or parallel-curved components by means of V transmission makes use of directional variation of the acoustic axes in the case of antenna arrays by varying the signal frequency or by varying the phase difference between adjacent individual antennas. The measurement arrangement consists of an array of transmitting and an array of receiving antennas (3, 4) which are subdivided for their part into two transmitting antenna arrays (5, 6) and two receiving antenna arrays (7, 8). Synchronous pivoting of the acoustic axes of the antenna arrays (5, 7) is used to search for the maximum received signal. In a second step, use is made of synchronous pivoting of the acoustic axes of the antenna arrays (6, 8) likewise to search for the maximum received signal. The sound velocities and the wall thicknesses of the workpiece (1) under test are determined by a computer from the two signal frequencies or phase differences corresponding to the maximum received signals.



Data supplied from the *esp@cenet* database - Worldwide

BEST AVAILABLE COPY



DEUTSCHES

PATENTAMT

21 Aktenzeichen: P 34 25 811.6

22 Anmeldetag: 13. 7. 84

43 Offenlegungstag: 14. 3. 85

DE 3425811 A1

30 Innere Priorität: 32 33 31

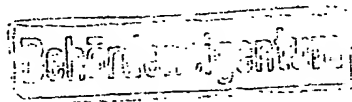
14.07.83 DE 33 25 487.7

71 Anmelder:

Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der
angewandten Forschung e.V., 8000 München, DE

72 Erfinder:

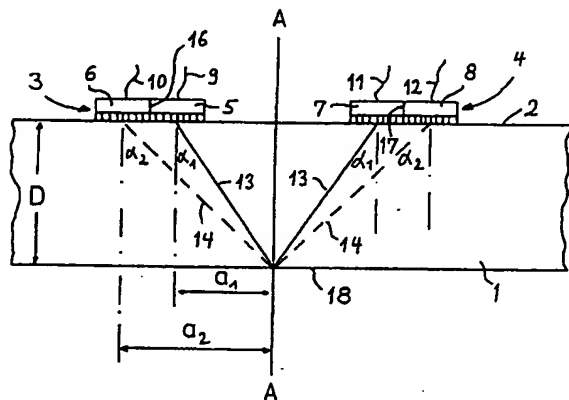
Gebhardt, Wolfgang, Dipl.-Phys. Dr., 6683
Spiesen-Elversberg, DE



Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

54 Verfahren zum Bestimmen der Wandstärke eines Werkstückes und/oder der Schallgeschwindigkeit in einem Werkstück sowie Vorrichtung zur Durchführung der Verfahren

Ein Verfahren zur unabhängigen Bestimmung sowohl der Schallgeschwindigkeiten von Ultraschallwellen als auch der Wandstärke von planparallelen oder parallel gekrümmten Bauteilen mittels V-Durchschallung verwendet eine Richtungsvariation der akustischen Achsen bei Gruppenstrahlern durch Variation der Signalfrequenz oder durch Variation der Phasendifferenz zwischen benachbarten Einzelschwingern. Die Meßanordnung besteht aus einem Sende- und einem Empfangsgruppenstrahler (3, 4), welche ihrerseits in zwei sendende Gruppenstrahler (5, 6) und zwei empfangende Gruppenstrahler (7, 8) unterteilt sind. Durch synchrones Schwenken der akustischen Achsen der Gruppenstrahler (5, 7) wird das maximale Empfangssignal gesucht. In einem zweiten Schritt wird durch synchrones Schwenken der akustischen Achsen der Gruppenstrahler (6, 8) ebenfalls das maximale Empfangssignal gesucht. Aus den beiden den maximalen Empfangssignalen entsprechenden Signalfrequenzen bzw. Phasendifferenzen werden die Schallgeschwindigkeiten und die Wandstärken des untersuchten Werkstücks (1) rechnerisch bestimmt.



DE 3425811 A1

Kaiser-Joseph-Str. 179 · Postfach 1310 · D-7800 Freiburg

Dipl.-Phys. Dr.-Ing. Karl Rackette
Patentanwalt

European Patent Attorney
Europäischer Patentvertreter
Mandataire en Brevets Européens

Kaiser-Joseph-Strasse 179
Postfach 1310
D-7800 Freiburg

Telefon: (0761) 3 18 90

Telefax: +49 761 31899

Telex: 77 25 99 raket d

Telegramme: Patentservice Freiburg

Unser Zeichen: IZP-P11

FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT ZUR FÖRDERUNG
DER ANGEWANDTEN FORSCHUNG E.V.

Leonrodstraße 54
8000 München 19

Verfahren zum Bestimmen der
Wandstärke eines Werkstückes und/oder
der Schallgeschwindigkeit in einem Werkstück
sowie Vorrichtung zur Durchführung der Verfahren

PATENTANSPRÜCHE

1. Verfahren zum Bestimmen der Wandstärke eines Werkstückes mittels Ultraschall, dadurch gekennzeichnet, daß ein Ultraschallwellen

sendendes erstes und ein Ultraschallwellen empfangendes zweites lineares Gruppenstrahlerpaar, die jeweils aus zwei in Strahlungsrichtung in einem Abstand voneinander angeordnete Gruppenstrahler bestehen, in Strahlungsrichtung in einem vorherbestimmten Abstand voneinander auf die Oberfläche des zu untersuchenden Werkstückes aufgesetzt werden, daß durch den sendenden ersten Gruppenstrahler des ersten Gruppenstrahlerpaares durch Schwenken der Schallbündelachse Ultraschallwellen unter mehreren Einschallwinkeln in das Werkstück eingeschallt werden, die durch den bezüglich des Mittelpunktes zwischen den Gruppenstrahlerpaaren symmetrisch zum ersten sendenden Gruppenstrahler angeordneten empfangenden ersten Gruppenstrahler des zweiten Gruppenstrahlerpaares nach einer Reflexion an der Werkstückrückwand empfangen werden, wobei der die Richtcharakteristik bestimmende Empfangswinkel des empfangenden ersten Gruppenstrahlers synchron zum Einschallwinkel geändert wird, daß der Einschallwinkel und der entsprechende Empfangswinkel ermittelt werden, bei denen das Empfangssignal die maximale Amplitude aufweist, daß für den sendenden zweiten Gruppenstrahler des ersten Gruppenstrahlerpaares und den empfangenden zweiten Gruppenstrahler des zweiten Gruppenstrahlerpaares der Einschallwinkel und der entsprechende Empfangswinkel ebenfalls ermittelt werden, bei denen die maximale Amplitude des Empfangssignals auftritt und daß aus den den beiden maximalen Empfangssignalen zugeordneten Winkelsteuergrößen und dem Abstand der sendenden ersten und zweiten Gruppenstrahler vom Mittelpunkt zwischen den Gruppenstrahlerpaaren der der Wandstärke des Werkstückes entsprechende Abstand zwischen der Werk-

stückoberfläche und dem auf der Werkstückrückwand liegenden Reflexionspunkt bestimmt wird.

2. Verfahren zum Bestimmen der Schallgeschwindigkeit in einem Werkstück mittels Ultraschall, dadurch gekennzeichnet, daß ein Ultraschallwellen sendendes erstes und ein Ultraschallwellen empfangendes zweites lineares Gruppenstrahlerpaar, die jeweils aus zwei in Strahlungsrichtung in einem Abstand voneinander angeordnete Gruppenstrahler bestehen, in Strahlungsrichtung in einem vorherbestimmten Abstand voneinander auf die Oberfläche des zu untersuchenden Werkstückes aufgesetzt werden, daß durch den sendenden ersten Gruppenstrahler des ersten Gruppenstrahlerpaares durch Schwenken der Schallbündelachse Ultraschallwellen unter mehreren Einschallwinkeln in das Werkstück eingeschallt werden, die durch den bezüglich des Mittelpunktes zwischen den Gruppenstrahlerpaaren symmetrisch zum ersten sendenden Gruppenstrahler angeordneten empfangenden ersten Gruppenstrahler des zweiten Gruppenstrahlerpaares nach einer Reflexion an der Werkstückrückwand empfangen werden, wobei der die Richtcharakteristik bestimmende Empfangswinkel des empfangenden ersten Gruppenstrahlers synchron zum Einschallwinkel geändert wird, daß der Einschallwinkel und der entsprechende Empfangswinkel ermittelt werden, bei denen das Empfangssignal die maximale Amplitude aufweist, daß für den sendenden zweiten Gruppenstrahler des ersten Gruppenstrahlerpaares und den empfangenden zweiten Gruppenstrahler des zweiten Gruppenstrahlerpaares der Einschallwinkel

und der entsprechende Empfangswinkel ebenfalls ermittelt werden, bei denen die maximale Amplitude des Empfangssignals auftritt und daß aus den beiden maximalen Empfangssignalen zugeordneten Winkelsteuergrößen, den Abständen der sendenden ersten und zweiten Gruppenstrahler vom Mittelpunkt zwischen den Gruppenstrahlerpaaren sowie den Abständen der Einzelschwinger der Gruppenstrahler und der der maximalen Empfangsamplitude zugeordneten Frequenz die Schallgeschwindigkeit im Werkstück bestimmt wird.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß ein Schwenken der Schallbündelachse und ein Schwenken des Empfangswinkels durch Verändern der Steuersignalfrequenz von Gruppenstrahlern erfolgt, deren benachbarte jeweils entgegengesetzt polarisierte Einzelschwinger um 180° phasenverschobene Ultraschallwellen aussenden.
4. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß die Wandstärke D aus den beiden maximalen Empfangssignalen zugeordneten Steuersignalfrequenzen f_1 und f_2 sowie den halben Abständen a_1 zwischen den ersten Gruppenstrahlern der Gruppenstrahlerpaare und den halben Abständen a_2 zwischen den zweiten Gruppenstrahlern der Gruppenstrahlerpaare nach der Gleichung

$$D = a_1 \cdot \sqrt{\frac{1 - (f_2/f_1)^2}{(f_2/f_1)^2 - (a_1/a_2)^2}}$$

berechnet wird.

5. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß die Schallgeschwindigkeit c aus den beiden maximalen Empfangssignalen zugeordneten Steuersignalfrequenzen f_1 und f_2 sowie den halben Abständen a_1 zwischen den ersten Gruppenstrahlern der Gruppenstrahlerpaare und den halben Abständen a_2 zwischen den zweiten Gruppenstrahlern der Gruppenstrahlerpaare nach der Gleichung

$$c = 2 \cdot d \cdot f_1 \sqrt{\frac{(f_2/f_1)^2 - (a_1/a_2)^2}{1 - (a_1/a_2)^2}}$$

berechnet wird, wobei der Mitten-Mitten-Abstand zwischen den Einzelschwingern mit d bezeichnet ist.

6. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß bei fester Steuersignalfrequenz ein Schwenken der Schallbündelachse der sendenden Gruppenstrahler durch Verändern der Phasendifferenz erfolgt, mit der benachbarte Einzelschwinger der Gruppenstrahler angeregt werden, und daß ein Schwenken des Empfangswinkels der empfangenden Gruppenstrahler durch Verändern der Phasendifferenz erfolgt, mit der die von benachbarten Einzelschwingern gelieferten Empfangssignale überlagert werden.
7. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß die Wandstärke D aus den beiden maximalen Empfangssignalen zugeordneten Phasendifferenzen ϕ_1 und ϕ_2 sowie den halben Abständen a_1 zwischen den ersten Gruppenstrahlern

der Gruppenstrahlerpaare und den halben Abständen a_2 zwischen den zweiten Gruppenstrahlern der Gruppenstrahlerpaare nach der Gleichung

$$D = a_1 \cdot \sqrt{\frac{1 - (\phi_1/\phi_2)^2}{(\phi_1/\phi_2)^2 - (a_1/a_2)^2}}$$

berechnet wird.

8. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß die Schallgeschwindigkeit c aus den den beiden maximalen Empfangssignalen zugeordneten Phasendifferenzen ϕ_1 und ϕ_2 sowie dem halben Abstand a_1 zwischen den ersten Gruppenstrahlern der Gruppenstrahlerpaare und dem halben Abstand a_2 zwischen den zweiten Gruppenstrahlern der Gruppenstrahlerpaare nach der Gleichung

$$c = \frac{2\pi df}{\phi_1} \sqrt{\frac{(\phi_1/\phi_2)^2 - (a_1/a_2)^2}{1 - (a_1/a_2)^2}}$$

berechnet wird, wobei der Mitten-Mitten-Abstand zwischen den Einzelschwingern mit d bezeichnet ist.

9. Vorrichtung zur Durchführung des Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, daß sie im Abstand voneinander ein sendendes erstes und ein empfangendes zweites lineares Gruppenstrahlerpaar (3, 4) mit jeweils einem ersten und einem zweiten Gruppenstrahler (5, 6, 7, 8) aufweist, wobei die innen liegenden ersten Gruppenstrahler (5, 7) in einem Abstand ($2 \cdot a_1$) und die außen liegenden zweiten Gruppenstrahler (6, 8) in einem größeren Abstand

(2 . a₂) voneinander angeordnet sind, daß wahlweise der erste oder der zweite Gruppenstrahler (5, 6) des ersten Gruppenstrahlerpaares (3) an einen Leistungsteiler (20) und einen Burstgenerator (24, 34) enthaltende Ansteuerschaltung angeschlossen ist, durch die der Einschallwinkel des Ultraschalls veränderbar ist, daß wahlweise der erste oder der zweite Gruppenstrahler (7, 8) des zweiten Gruppenstrahlerpaares (4) an einen Leistungssummierer (28) und einen Spitzenwertdetektor (27) enthaltende Empfangsschaltung angeschlossen ist, durch die bei sich veränderndem Einschallwinkel und sich veränderndem Empfangswinkel für den ersten Gruppenstrahler (7) und den zweiten Gruppenstrahler (8) des zweiten Gruppenstrahlerpaares (4) die dem jeweils maximalen Empfangssignal zugeordneten Winkelsteuergrößen (f_1 , f_2 , ϕ_1 , ϕ_2) erfaßt werden und daß der Spitzenwertdetektor (27) mit einer Auswerteeinheit (26) verbunden ist, durch die die gesuchte Meßgröße (D, c) aus den von dem Spitzenwertdetektor (27) ausgezeichneten Winkelsteuergrößen (f_1 , f_2 , ϕ_1 , ϕ_2) für die Einschallwinkel- und Empfangswinkelverschwenkung errechenbar ist.

10. Vorrichtung nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß die akustischen Achsen der Gruppenstrahler (5, 6, 7, 8) frequenzabhängig sind und daß der Burstgenerator (24) durchstimmbar ist, wobei durch den Spitzenwertdetektor (27) jeweils bei der Frequenz (f_1 , f_2) des Empfangssignals mit der maximalen Amplitude ein Ausgangssignal für die Auswerteeinheit (26) erzeugbar ist.

11. Vorrichtung nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß die Einzelschwinger (15) der Gruppenstrahlerpaare (3, 4) über steuerbare Phasenschieber (32, 36) mit dem Leistungsteiler (20) bzw. dem Leistungssummierer (28) verbunden sind und daß durch den Spitzenwertdetektor (27) jeweils bei der der maximalen Amplitude des Empfangssignals zugeordneten Phasendifferenz (ϕ_1 , ϕ_2) benachbarter Einzelschwinger (15) ein Ausgangssignal für die Auswerteeinheit (26) erzeugbar ist.

Verfahren zum Bestimmen der
Wandstärke eines Werkstückes und/oder
der Schallgeschwindigkeit in einem Werkstück
sowie Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens

Die Erfindung betrifft Verfahren zur unabhängigen Bestimmung sowohl der Schallgeschwindigkeiten von Longitudinal- und Transversalwellen als auch der Wandstärke mittels V-Durchschallung. Insbesondere betrifft die Erfindung Verfahren gemäß den Oberbegriffen der Ansprüche 1 und 2 und eine Vorrichtung zur Durchführung der Verfahren.

Eine wichtige Voraussetzung bei der Prüfung von Werkstücken und Anlagenkomponenten mit Methoden der Ultraschalltechnik ist die genaue Kenntnis der Geschwindigkeit von Transversal- und Longitudinalwellen und damit verknüpft bei gegebener Prüffrequenz deren Wellenlänge. Eine Variation der Schallgeschwindigkeit von nur wenigen Prozent kann zu einem erheblichen Schallbündelversatz und damit zu großen Ungenauigkeiten bei der Ortung sowie zu Störungen der Schallfeldstruktur führen. Insbesondere ist die genaue Kenntnis der Schallgeschwindigkeit und/oder der Wandstärke dann erforderlich, wenn Rohre mit einer Längsnaht gemäß dem Impuls-Echo-Verfahren geprüft werden, indem schräg zur Umfangsrichtung Ultraschall von der Außenwand zur Innenwand des Rohres übertragen wird und dort so reflektiert werden soll, daß die Längsnaht des Rohres seitlich angeschallt wird und das Echo nach einer weiteren Reflexion und Eintreffen im Prüfkopf untersucht wird. Geringe Änderungen der Schallgeschwindigkeit oder geringe Änderungen der Wandstärke des Rohres führen bereits dazu, daß der angeschallte Bereich der Rohrnaht stark verschoben wird.

Die Bestimmung der Schallgeschwindigkeit erfolgt beim Stand der Technik durch eine Laufzeitmessung bei bekanntem Schallaufweg. Hierzu nimmt man in der Regel die Bauteildicke. Ist jedoch ein Bauteil nur von außen zugänglich und ist dessen Dicke nicht bekannt, so fällt diese Art der Schallgeschwindigkeitsmessung aus. Neben der Schallgeschwindigkeitsmessung hat aber auch die reine Waddickenmessung eine erhebliche prüftechnische Bedeutung, wozu dann jedoch die exakte Kenntnis der Schallgeschwindigkeit notwendig ist.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren und eine Vorrichtung zu schaffen, die es gestatten, unabhängig von der Kenntnis des Schallaufwegs bzw. der Wandstärke eines Bauteils und der Schallgeschwindigkeit jeweils die Schallgeschwindigkeit bzw. die Wandstärke ohne a priori Kenntnisse zu messen.

Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß bezüglich der Wandstärkenmessung durch die kennzeichnenden Merkmale des Anspruchs 1 gelöst. Die Merkmale des kennzeichnenden Teils des Anspruchs 2 lösen erfindungsgemäß die Aufgabe bezüglich der Bestimmung der Schallgeschwindigkeit. Die vorrichtungsmäße Lösung ist im Anspruch 9 angegeben.

Die erfindungsgemäße Lösung gestattet es, ohne a priori Kenntnisse lediglich durch Ermitteln der maximalen Amplitude zweier Signale in Abhängigkeit einer sich kontinuierlich ändernden Frequenz oder sich kontinuierlich ändernden Phasendifferenz die Wandstärke eines Werkstückes und die Schallgeschwindigkeit in diesem Werkstück zu ermitteln. Der Erfindung liegt dabei die Erkenntnis zugrunde, daß die aus der Trigonometrie zur

Abstandsbestimmung bekannten Methoden eingesetzt werden können, wenn der Empfangswinkel der maximalen Empfindlichkeit zweier seitlich versetzter Ultraschallempfänger synchron mit dem Einschallwinkel zweier seitlich versetzter Ultraschallsender verändert wird. Auf diese Weise gelangt die maximale Schallamplitude immer nur dann zum Ultraschallempfänger, wenn eine Reflexion genau am Schnittpunkt der Mittelebene zwischen den Ultraschallsendern und den Ultraschallempfängern mit der Werkstückrückwand erfolgt. Ausgesendeter Ultraschall, der außerhalb dieses Bereiches auftrifft, wird unter einem Winkel zurückreflektiert, für den die Empfänger unempfindlich oder weniger empfindlich sind. Mit Hilfe zweier verschiedener Einschallwinkel und entsprechender Empfangswinkel ist es daher möglich, die Wandstärke auf der Grundlage trigonometrischer Funktionen zu bestimmen. Die Verschwenkung des Einschallwinkels bzw. der Selektivität für einen bestimmten Empfangswinkel kann bei den Ultraschallprüfköpfen besonders einfach durchgeführt werden, wenn Gruppenstrahler verwendet werden.

Zweckmäßige Ausgestaltungen und Weiterbildungen der Erfindung sind in den Unteransprüchen gekennzeichnet.

Ausführungsbeispiele der Erfindung werden anhand der Figuren 1 bis 6 erläutert. Es zeigen:

Fig. 1 ein Werkstück im Längsschnitt mit zwei aufgesetzten Gruppenstrahlerpaaren zur Erläuterung des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips,

- Fig. 2 in schematischer Ansicht einen Gruppenstrahler mit abwechselnd entgegengesetzt polarisierten Einzelschwingern,
- Fig. 3 einen Gruppenstrahler in einer Fig. 2 entsprechenden Darstellungsweise mit gleichartig polarisierten Einzelschwingern,
- Fig. 4 ein Blockschaltbild einer erfindungsgemäßen Vorrichtung zur Verwendung mit Gruppenstrahlern gemäß Fig. 2,
- Fig. 5 ein Blockschaltbild einer erfindungsgemäßen Vorrichtung zur Verwendung mit Gruppenstrahlern gemäß Fig. 3 und
- Fig. 6 eine Skizze zur Veranschaulichung der Schallaufwege bei einem gekrümmten Werkstück.

In Fig. 1 ist zur Veranschaulichung der Grundlagen der Erfindung ein Werkstück 1 mit einer Wandstärke D dargestellt, auf dessen Oberfläche 2 beidseitig einer rechtwinklig zur Oberfläche 2 verlaufenden Symmetrieebene A-A lineare Gruppenstrahlerpaare (Linear-Array) 3 und 4 aufgesetzt sind. Sowohl das als linearer Gruppenstrahler ausgebildete erste Gruppenstrahlerpaar 3 als auch das als linearer Gruppenstrahler ausgebildete zweite Gruppenstrahlerpaar 4 besteht aus $2N$ Einzelschwingern. Das erste Gruppenstrahlerpaar 3 ist aus einem linearen ersten Gruppenstrahler 5 und einem linearen zweiten Gruppenstrahler 6 zusammengesetzt, während das zweite Gruppenstrahlerpaar 4 aus einem linearen ersten Gruppenstrahler 7 und einem linearen zweiten Gruppenstrahler 8 besteht. Die Anschlußleitungen der Gruppenstrahler 5 bis 8 sind durch Anschlußleitungen 9, 10, 11 und 12 veranschaulicht.

Das erfindungsgemäße Meßverfahren gestattet es, in V-Durchschallung ohne a priori-Kenntnisse unabhängig voneinander sowohl die Wandstärke als auch die Schallgeschwindigkeit zu messen. Das Meßprinzip ergibt sich aus dem in Fig. 1 zwischen dem sendenden ersten Gruppenstrahler 5 und dem empfangenden ersten Gruppenstrahler 7 als durchgezogene Linie dargestellten Schallaufweg 13 und dem zwischen dem sendenden zweiten Gruppenstrahler 6 und dem empfangenden zweiten Gruppenstrahler 8 gestrichelt dargestellten Schallaufweg 14.

Die Gruppenstrahler 5, 6, 7 und 8 können, wie in Fig. 2 dargestellt ist, aus einer Reihe von Einzelschwingern 15 bestehen, die jeweils im Abstand d voneinander angeordnet sind und so ausgebildet sind, daß benachbarte Einzelschwinger 15 entgegengesetzt polarisiert sind. Benachbarte Einzelschwinger besitzen daher stets eine Phasendifferenz von 180° . Statt einer solchen starren Phasendifferenz von 180° zwischen zwei benachbarten Einzelschwingern 15 können auch andere Phasendifferenzen vorgesehen werden, wobei diese Phasendifferenz statt durch abwechselnde Polarisierung der Einzelschwinger 15 auch durch elektrische oder elektronische Phasenstellglieder realisiert werden kann, wie weiter unten erörtert ist.

Wie in Fig. 1 durch Trennlinien 16 und 17 angedeutet ist, ist das erste Gruppenstrahlerpaar 3 in einen sendenden ersten Gruppenstrahler 5 und einen sendenden zweiten Gruppenstrahler 6 mit jeweils N Einzelschwingern elektrisch unterteilt. Wird eine solche Schwingeranordnung mit einer Frequenz f erregt, so wird eine schräg laufende Ultraschallwelle erzeugt. Die Richtung der Schallbündelachse α ist dabei gegeben durch

$$\alpha = \arcsin \frac{c}{2 \cdot d \cdot f} \quad (1)$$

Durch den Mitten-Mitten-Abstand d der Einzelschwinger 15 wird die Wellenart (Transversal- oder Longitudinalwelle) festgelegt. Die Schallgeschwindigkeit der angeregten Wellenart ist mit c bezeichnet. Durch Variation der Sendefrequenz ändert sich der Einschallwinkel α gemäß der obigen Gleichung. Der Abstand d entspricht vorzugsweise der halben Wellenlänge.

Zum Empfang der vom ersten Gruppenstrahlerpaar 3 ausgesandten Ultraschallwellen dient das zweite Gruppenstrahlerpaar 4, welches identisch dem sendenden ersten Gruppenstrahlerpaar 3 aufgebaut ist und elektrisch ebenfalls in einen ersten Gruppenstrahler 7 und einen zweiten Gruppenstrahler 8 mit jeweils N Einzelschwingern aufgeteilt ist. Bei gegebener Signalfrequenz sind die Sende- und Empfangscharakteristiken der Gruppenstrahler 5, 6, 7 und 8 identisch.

Der Meßvorgang läuft in zwei Schritten ab. Zuerst sendet der erste Gruppenstrahler 5 einen Ultraschallimpuls der Frequenz f aus. Dieser wird an der Rückwand 18 des Werkstücks 1 gespiegelt und vom ersten Gruppenstrahler 7 des empfangenden zweiten Gruppenstrahlerpaars 4 empfangen. Dabei ist zu beachten, daß neben den in Fig. 1 durch die Linien 13 und 14 dargestellten akustischen Achsen Ultraschall, wenn auch in geringerer Intensität, wegen der Keulenform der Richtcharakteristiken auch in andere Richtungen als der Hauptrichtung ausgesandt und empfangen wird. Die Richtungen der akustischen Achsen des sendenden ersten Gruppenstrahlers 5 und des empfangenden ersten Gruppenstrahlers 7

sind durch die obige Gleichung (1) gegeben und schneiden sich infolge der Winkelgleichheiten auf der in Fig. 1 dargestellten Linie A-A. Durch Verändern der Signalfrequenz ändern sich die Richtcharakteristiken der Gruppenstrahler 5 und 7, so daß der Schnittpunkt der Schallbündelachse des Gruppenstrahlers 5 mit der den Empfangswinkel des Gruppenstrahlers 7 veranschaulichenden Achse entlang dieser Linie A-A wandert. Das Empfangssignal an der Anschlußleitung 11 wird dabei genau dann maximal, wenn der Schnittpunkt der akustischen Achsen auf der Rückwand 18 des Werkstücks 1 liegt. In diesem Fall ist die Größe des Einschallwinkels α_1 am ersten Gruppenstrahler 5 gleich dem die maximale Empfindlichkeitsrichtung angegebenden Empfangswinkel α_1 des empfangenden ersten Gruppenstrahlers 7.

Aus diesem Grunde wird die zum Einschallwinkel α_1 zugehörige Signalfrequenz f_1 abgelesen bzw. weiterverarbeitet, wenn das Signal an der Anschlußleitung 11 maximal wird. In einem zweiten Verfahrensschritt wird der oben beschriebene Vorgang wiederholt, wobei jedoch der zweite Gruppenstrahler 6 des ersten Gruppenstrahlerpaars 3 als Sender und der zweite Gruppenstrahler 8 des zweiten Gruppenstrahlerpaars 4 als Empfänger verwendet wird. Die maximale Höhe des Empfangssignals an der Anschlußleitung 12 ergibt sich nun bei einer Frequenz f_2 .

Wie man in Fig. 1 weiter erkennt, haben die ersten Gruppenstrahler 5, 7 jeweils einen Abstand a_1 von der durch die Linie A-A veranschaulichten Symmetrieebene. Die außen liegenden zweiten Gruppenstrahler 6 und 8 haben jeweils den Abstand a_2 von der Symmetrieebene zwischen dem ersten Gruppenstrahlerpaar 3 und dem zweiten Gruppenstrahlerpaar 4.

Aus den beiden Frequenzen f_1 und f_2 sowie aus den Mitten-Mitten-Abständen $2a_1$ und $2a_2$ der Gruppenstrahler 5, 6, 7 und 8 ergibt sich die Wandstärke D des Werkstücks 1 aufgrund der vorliegenden geometrischen Verhältnisse nach der Formel

$$D = a_1 \cdot \sqrt{\frac{1 - (f_2/f_1)^2}{(f_2/f_1)^2 - (a_1/a_2)^2}} \quad (2)$$

und die Schallgeschwindigkeit c nach der Formel

$$c = 2 \cdot d \cdot f_1 \sqrt{\frac{(f_2/f_1)^2 - (a_1/a_2)^2}{1 - (a_1/a_2)^2}} \quad (3)$$

Man erkennt, daß in diesen Gleichungen die Einschallwinkel selbst nicht mehr enthalten sind und daß das Verhältnis der Frequenzen bei maximalen Amplituden bei festliegenden Abständen a_1 und a_2 die im wesentlichen zu erfassende Größe ist.

Statt Gruppenstrahler mit der in Fig. 2 dargestellten abwechselnden Polarisierung zu verwenden, ist es auch möglich, Gruppenstrahler mit der in Fig. 3 dargestellten Anordnung einzusetzen. Der in Fig. 3 schematisch dargestellte Gruppenstrahler unterscheidet sich von dem in Fig. 2 dargestellten Gruppenstrahler lediglich dadurch, daß zwischen benachbarten Einzelschwingern 15 des Gruppenstrahlers keine konstante Phasendifferenz von 180° aufgeprägt ist. Alle Einzelschwinger 15 besitzen die gleiche Polarisierung. Die Schallbündelschwenkung geschieht bei einem Gruppenstrahler gemäß Fig. 3 nicht über die Signalfrequenz, sondern vielmehr nach der Art

des Phased-Array-Prinzips, das beispielsweise aus der Antennentechnik bekannt ist. Bei fester Signalfrequenz wird die Schallbündelschwenkung durch steuerbare Phasenstellglieder realisiert. Diese ermöglichen es, zwischen benachbarten Einzelschwingern 15 steuerbar definierte Phasendifferenzen einzustellen. Die Richtung der Schallbündelachse α ist mit der Phasendifferenz ϕ zwischen benachbarten Einzelschwingern 15 durch die Beziehung

$$\alpha = \arcsin \frac{\phi c}{2 \pi d f} \quad (4)$$

verknüpft. Durch elektronische Steuerung der Phasenstellglieder und damit der Phase der Einzelschwinger 15 wird die Richtung des Schallbündels und damit der Einschallwinkel variiert.

Der Meßvorgang läuft wie bei den Gruppenstrahlern gemäß Fig. 2 in zwei Schritten ab. Statt der Signalfrequenz wird hierbei jedoch die Phasendifferenz ϕ zur Schallbündelschwenkung benutzt. Die zu den maximalen Empfangssignalen gehörigen Phasendifferenzen ϕ_1 und ϕ_2 werden erfaßt und ausgewertet. Die Wandstärke D des Werkstücks 1 ergibt sich dann nach der Gleichung

$$D = a_1 \cdot \sqrt{\frac{1 - (\phi_1/\phi_2)^2}{(\phi_1/\phi_2)^2 - (a_1/a_2)^2}} \quad (5)$$

und die Schallgeschwindigkeit c nach der Formel

$$c = \frac{2 \pi d f}{\phi_1} \sqrt{\frac{(\phi_1/\phi_2)^2 - (a_1/a_2)^2}{1 - (a_1/a_2)^2}} \quad (6)$$

Aus den oben erläuterten Verfahrensprinzipien ergibt sich die Realisierbarkeit eines Verfahrens zur unabhängigen Bestimmung sowohl der Schallgeschwindigkeit von Longitudinal- und Transversalwellen als auch der Wandstärke von planparallelen oder parallel gekrümmten Werkstücken 1 mittels V-Durchschallung. Dabei erfolgt eine Richtungsvariation der akustischen Achsen der Schallsender und Schallempfänger nach dem Prinzip der Gruppenstrahler entweder durch Variation der Signalfrequenz der Gruppenstrahler gemäß Fig. 2 oder durch Variation der Phasendifferenz zwischen benachbarten Einzelschwingern von Gruppenstrahlern gemäß Fig. 3.

Die Meßanordnung zur Durchführung des Meßverfahrens besteht aus einem sendenden ersten Gruppenstrahlerpaar 3 und einem empfangenden zweiten Gruppenstrahlerpaar 4, welche ihrerseits jeweils aus zwei Gruppenstrahlern 5, 6 bzw. 7, 8 bestehen, wie in Fig. 1 dargestellt ist.

Durch synchrones Verschwenken der akustischen Achsen der Gruppenstrahler 5 und 7 wird das maximale Empfangssignal gesucht. Dies tritt dann auf, wenn die Schnittpunkte der akustischen Achsen des sendenden Gruppenstrahlers 5 einerseits und des empfangenden Gruppenstrahlers 7 andererseits auf der Rückwand 18 des Werkstücks 1 liegen.

In einem zweiten Verfahrensschritt wird durch synchrones Schwenken der akustischen Achsen der außen liegenden Gruppenstrahler 6 und 8 ebenfalls das maximale Empfangssignal gesucht.

Aus den beiden den maximalen Empfangssignalen entsprechenden Signalfrequenzen bei Einsatz eines Gruppenstrahlers gemäß Fig. 2 bzw. Phasendifferenzen bei Einsatz eines Gruppenstrahlers gemäß Fig. 3 werden die Schallgeschwindigkeiten und die Bauteildicken gemäß den Formeln (2) und (3) bzw. (5) und (6) bestimmt.

Somit besteht das Verfahren darin, für zwei verschiedene Positionen des Ultraschallsenders und des Ultraschallempfängers diejenigen Frequenzen f_1 bzw. f_2 oder diejenigen Phasendifferenzen ϕ_1 , ϕ_2 zu bestimmen, bei denen eine maximale Signalübertragung erfolgt. Wenn dies der Fall ist, reflektiert die Rückwand 18 das vom sendenden Gruppenstrahler 5 bzw. 6 eingeschallte Ultraschallsignal infolge des jeweiligen Einschallwinkels gerade so, daß der reflektierte Schall bzw. die Hauptkeulen des reflektierten Schalls genau in den zugeordneten empfangenden Gruppenstrahler 7 bzw. 8 einfällt.

In Fig. 4 ist ein Blockschaltbild einer Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens dargestellt, bei der die Verschwenkung der akustischen Achsen frequenzabhängig ist.

Das erste Gruppenstrahlerpaar 3 ist mit dem Ausgang eines Leistungsteilers 20 verbunden, der es gestattet, die über seinen Eingang 21 eingespeiste Energie gleichmäßig auf die in Fig. 4 dargestellte rechte Hälfte oder die linke Hälfte des ersten Gruppenstrahlerpaares 3 zu verteilen. Diese Hälften entsprechen den Gruppenstrahlern 5, 6 in Fig. 1.

Die Umschaltung des Leistungsteilers 20 erfolgt mit Hilfe eines Steuerwerks 22, das auch einen über eine

Leistungsendstufe 23 an den Leistungsteiler 20 angekoppelten Burstgenerator 24 steuert, der auf diese Weise unter der programmierten Kontrolle des Steuerwerks 22 Sinusbursts von etwa 5 bis 10 Wellenlängen erzeugt, deren Mittenfrequenz von Schuß zu Schuß etwa zwischen 1 und 5 MHz kontinuierlich geändert wird.

Die vom Burstgenerator 24 erzeugte Mittenfrequenz wird über einen Frequenzmesser 25 an eine Auswerteeinheit 26 übermittelt, die die Wandstärke D bzw. die Schallgeschwindigkeit c auf der Grundlage der obigen Gleichungen berechnet.

Die Auswerteeinheit 26 wird ebenfalls über das Steuerwerk 22 angesteuert, das, wie aus Fig. 4 ersichtlich ist, auf der Ultraschallempfangsseite weiterhin an einen Spitzenwertdetektor 27 sowie einen Leistungssummierer 28 angeschlossen ist.

Der Leistungssummierer 28 ist eingangsseitig mit dem zweiten Gruppenstrahlerpaar 4 verbunden, dessen Hälften den in Fig. 1 dargestellten Gruppenstrahlern 7 und 8 entsprechen. Unter der Steuerung des Steuerwerks 22 überträgt der Leistungssummierer 28 das Ausgangssignal der linken bzw. rechten Hälfte des zweiten Gruppenstrahlerpaars 4 zu einem Empfänger 29 mit einem Demodulierer und Gleichrichter. Der Ausgang des Empfängers 29 ist mit dem Spitzenwertdetektor 27 verbunden, so daß unter der Kontrolle des Steuerwerks 22 die Eingangssignale für die Auswerteeinheit 26 ermittelt werden können, d.h. diejenigen Frequenzen f_1 und f_2 des Burstgenerators 24, bei denen am Spitzenwertdetektor 27 ein maximales Empfangssignal ermittelt wird. Nach Durchschwenken der akustischen Achsen der beiden Gruppen-

strahlerpaare 3, 4 stehen somit am Eingang der Auswerteeinheit 26 die erforderlichen Meßdaten zur Bestimmung der Wandstärke D und der Schallgeschwindigkeit c zur Verfügung. Die weiteren Parameter d , a_1 und a_2 sind in einem Speicher der Auswerteeinheit 26 gespeichert und werden je nach den geometrischen Verhältnissen der Meßanordnung geändert bzw. erneuert.

In Fig. 5 ist eine weitere Vorrichtung zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens dargestellt. Mit Fig. 4 übereinstimmende Baugruppen sind mit den gleichen Bezugszeichen versehen. Da es schaltungstechnisch einfacher ist, Frequenzen zu verstellen als Phasenschieber bzw. Laufzeitverzögerungsglieder zu verstellen, ist der Schaltungsaufwand für die in Fig. 5 dargestellte Vorrichtung erheblich größer als der für die in Fig. 4 dargestellte Vorrichtung.

In Fig. 5 erkennt man wiederum die Gruppenstrahlerpaare 3 und 4, die sendeseitig bzw. empfangsseitig eingesetzt werden. Das Gruppenstrahlerpaar 3 ist über Leistungsverstärker 31 mit Phasenschiebern 32 verbunden, die durch das Steuerwerk 22 programmierbar sind. Auf diese Weise wird zwischen den Einzelschwingern 15 des Gruppenstrahlerpaares 3 eine durch das Steuerwerk 22 festlegbare Phasendifferenz erzeugt, was seinerseits einen bestimmten Einschallwinkel definiert.

Das Steuerwerk 22 steuert einen Leistungsteiler 20, dessen Eingang 21 mit dem Ausgang eines Burstgenerators 34 verbunden ist, der im Gegensatz zum Burstgenerator 24 der Schaltung nach Fig. 4 mit einer konstanten Frequenz arbeitet.

.22.

Empfängerseitig sind die Einzelschwinger 15 über Vorverstärker 35 mit programmierbaren Phasenschiebern 36 verbunden. Je nach der vom Steuerwerk 22 vorgegebenen Phasenverschiebung oder Laufzeitverzögerung in den Phasenschiebern 36 erhält das Gruppenstrahlerpaar 4 einen Empfangswinkel, in dem die Richtungscharakteristik des Gruppenstrahlerpaares 4 eine besonders hohe Empfindlichkeit aufweist. Durch Verstellen der Phasenschieber 32 und 36 gestattet das Steuerwerk 22 es somit, die akustischen Achsen der Gruppenstrahlerpaare 3 und 4 zu verschwenken.

Die Ausgangsspannungen der Phasenschieber 36 gelangen über einen Leistungssummierer 28 zu einem Spitzenwertdetektor 27, der an eine Auswerteeinheit 26 angeschlossen ist. Die Auswerteeinheit 26 ist weiterhin mit einem Phasenmesser 27 verbunden, der die Phasendifferenz zwischen benachbarten Einzelschwingern 15 liefert. Da die Auswerteeinheit 26 sowie der Spitzenwertdetektor 27 und der Leistungssummierer 28 vom Steuerwerk 22 kontrolliert werden, gestattet es die in Fig. 5 dargestellte Schaltung, diejenigen Phasenwerte festzustellen, bei denen am Spitzenwertdetektor 27 ein maximales Signal auftritt. Die Auswerteeinheit 26 berechnet dann gemäß den oben angegebenen Gleichungen (5) und (6) die Wandstärken und die Schallgeschwindigkeiten. Wie bereits oben im Zusammenhang mit Fig. 4 erwähnt, sind die weiteren Parameter d , a_1 und a_2 in einem Speicher der Auswerteeinheit 26 gespeichert und werden je nach den geometrischen Verhältnissen der Meßanordnung geändert bzw. erneuert. Wenn statt ebener Werkstücke gekrümmte Werkstücke vermessen werden, enthält die Auswerteeinheit 26 auch noch Informationen über den Radius bzw. den Krümmungsradius des Werkstücks.

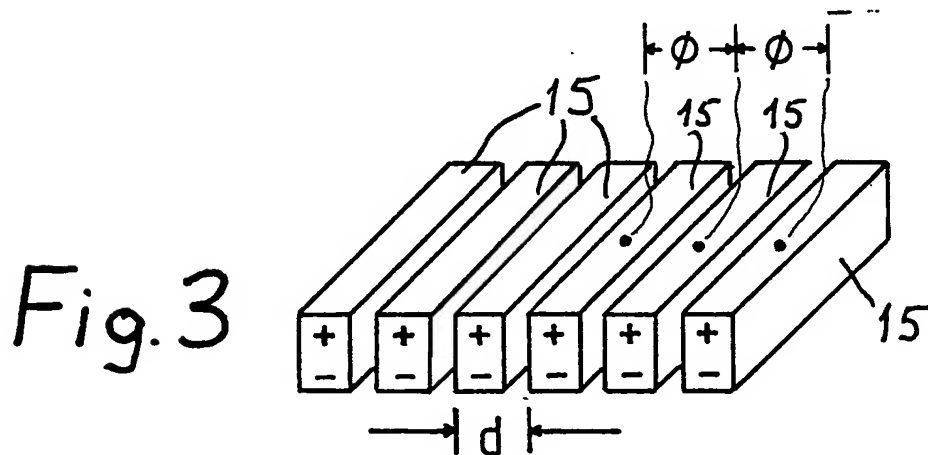
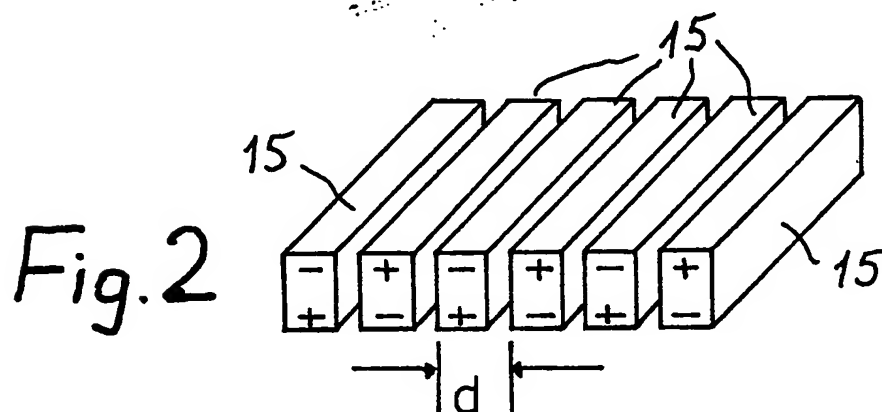
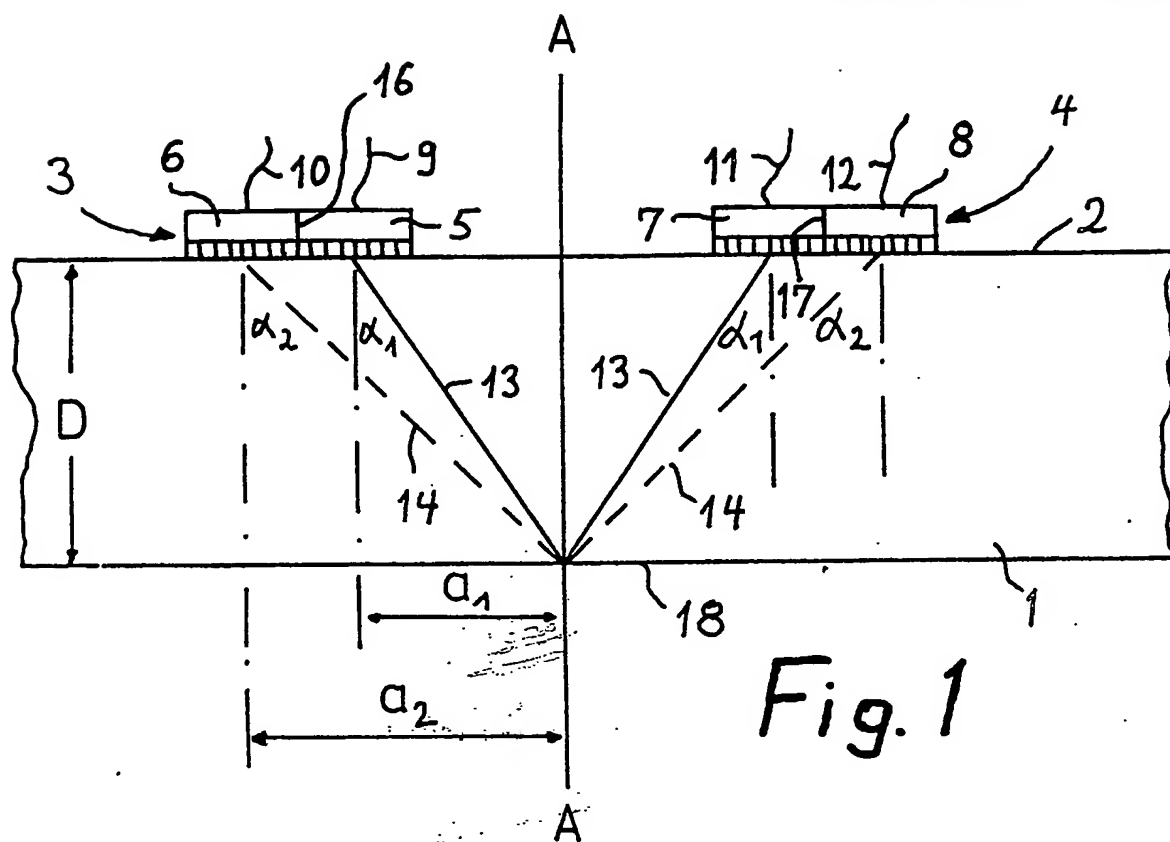
Selbstverständlich können die oben erörterten Verfahren und Vorrichtungen auch eingesetzt werden, wenn statt eines ebenen Werkstücks 1 ein gekrümmtes Werkstück, beispielsweise ein Rohr 41, untersucht wird. In Fig. 6 sind für diesen Fall die Schallaufwege und die verschiedenen von der Auswerteeinheit 26 bei der Berechnung in Betracht zu ziehenden Größen dargestellt. Bezeichnet man den Außen-Krümmungsradius mit R, so ergibt sich die Wanddicke D durch Auflösen der folgenden Gleichung nach D:

$$\left(a_2^2 + D^2 - \frac{a_2 D}{R}\right) \cdot \left(\frac{a_1}{a_2}\right)^2 = \left(\frac{f_2}{f_1}\right)^2 \cdot \left(\frac{\cos \beta_1}{\cos \beta_2}\right)^2 \cdot \left(a_1^2 + D^2 - \frac{a_1 D}{R}\right) \quad (7)$$

Zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit c geht man dann mit der aus der Gleichung (7) ermittelten Wandstärke D in die folgende Gleichung ein:

$$c = \frac{a_1}{\sqrt{a_1^2 + \left[D - \frac{a_1}{2R}\right]^2}} \cdot \frac{2 \cdot d \cdot f_1}{\cos \beta_1} \quad (8)$$

Für $R \rightarrow \infty$ und damit für $\beta_1 \rightarrow 0$, $\beta_2 \rightarrow 0$ ergeben sich die bereits oben angegebenen Gleichungen für den planparallelen Fall.



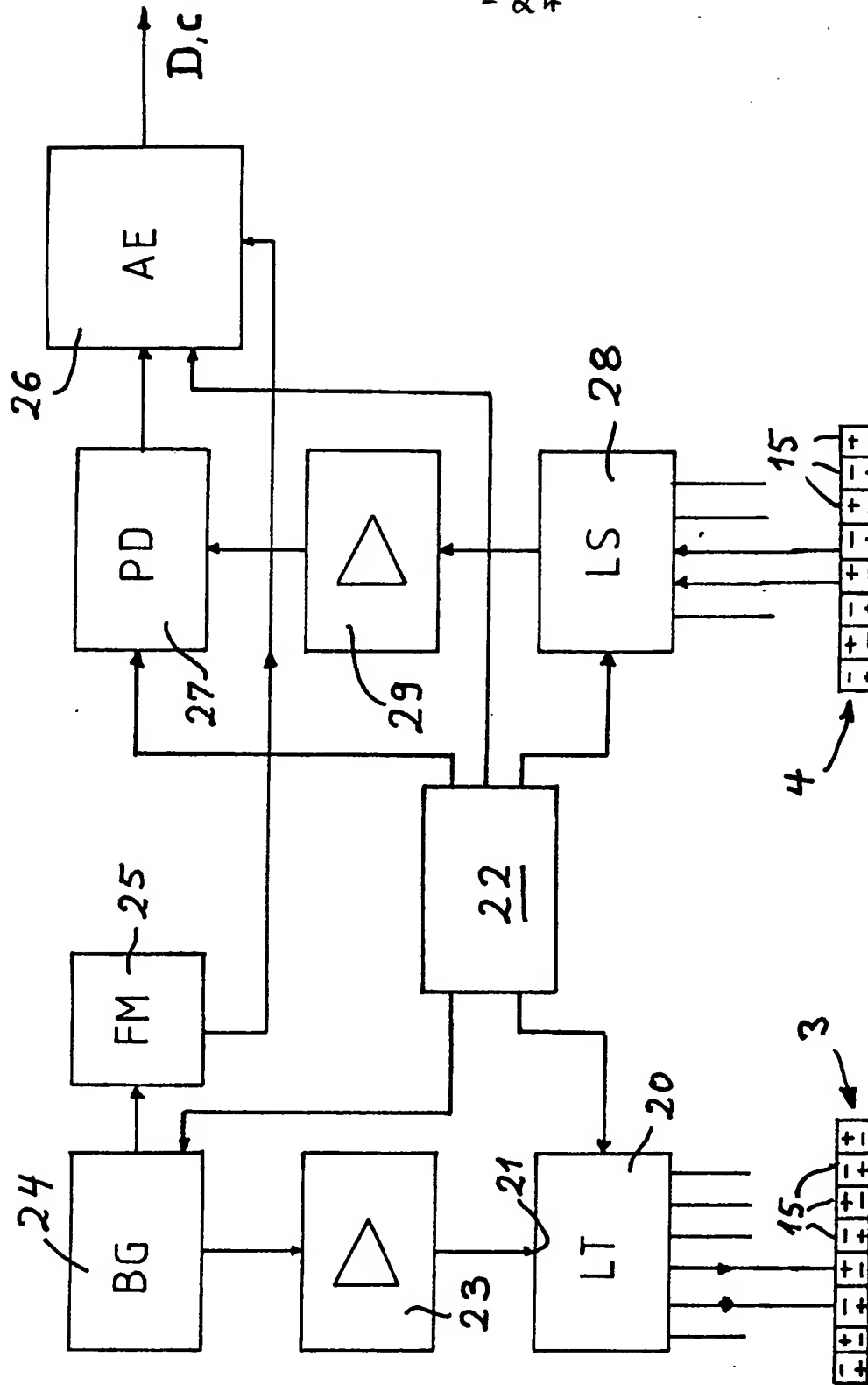


Fig. 4

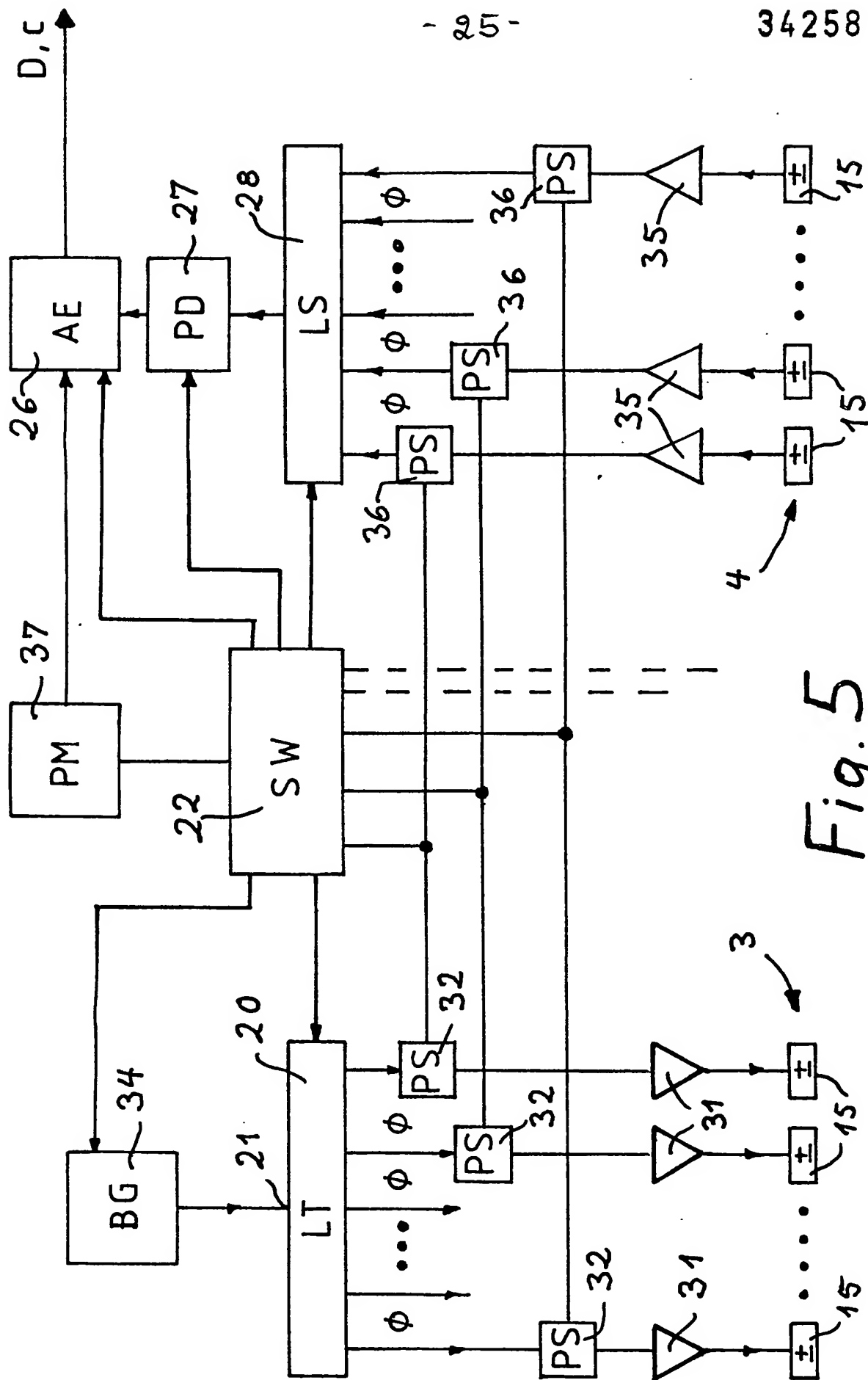


Fig. 5

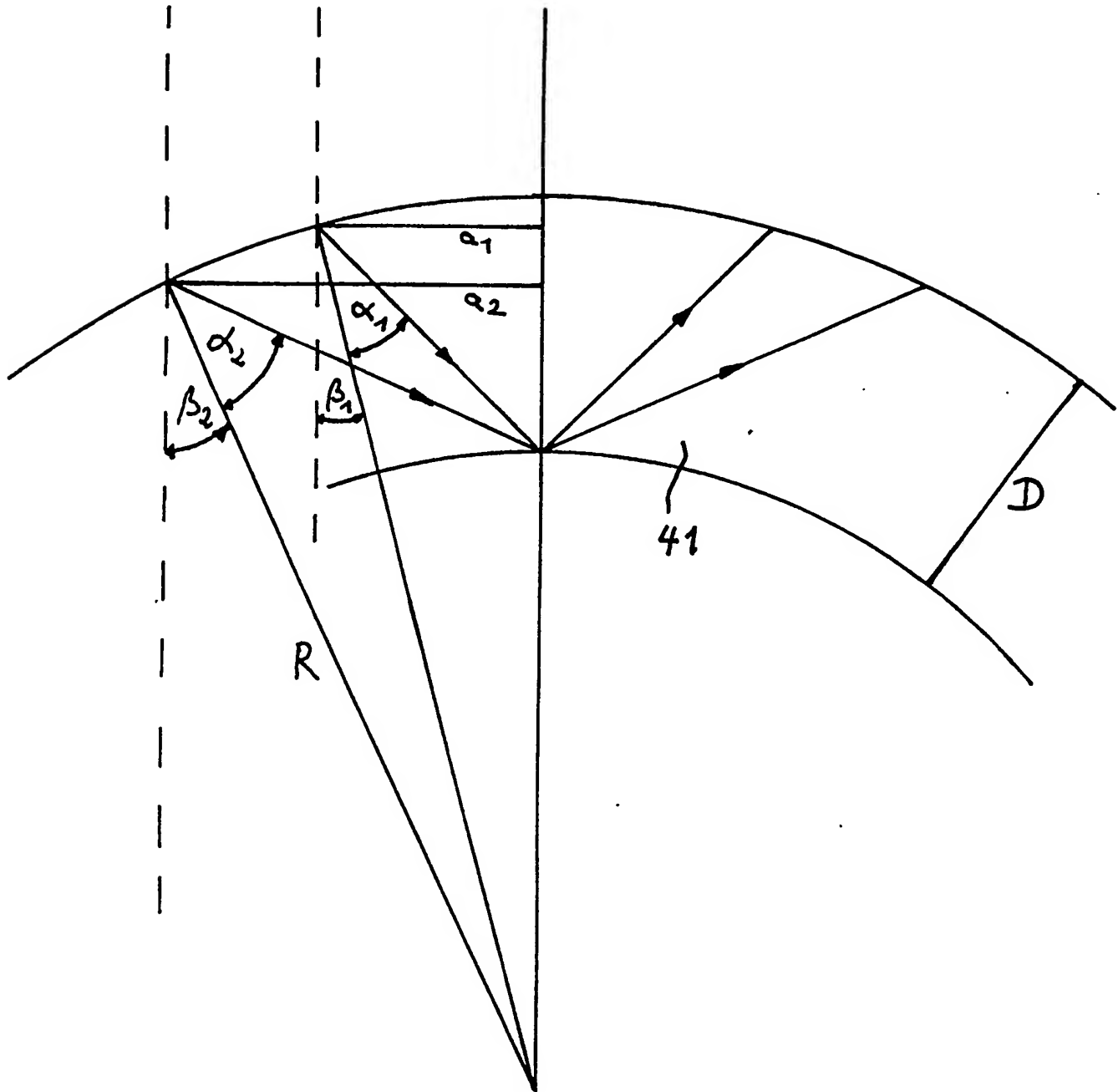


Fig. 6

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ **BLACK BORDERS**
- ☒ **IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**
- ☒ **FADED TEXT OR DRAWING**
- ☐ **BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING**
- ☐ **SKEWED/SLANTED IMAGES**
- ☐ **COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS**
- ☐ **GRAY SCALE DOCUMENTS**
- ☐ **LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT**
- ☐ **REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY**
- ☐ **OTHER:** _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.